

ОБ УСЛОВИЯХ ПОЛУЧЕНИЯ ДОСТОВЕРНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ КАБЕЛЬНЫМИ ТЕРМОПАРАМИ

Ю.К. Атрошенко, О.С. Гайдукова

Научный руководитель - старший преподаватель Ю.К. Атрошенко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Задача оперативного получения достоверных результатов измерения является одной из основных проблем метрологии. Важность решения вопроса обусловлена тем, что измерительные системы сегодня используются практически во всех отраслях промышленности: энергетика, нефтегазовый комплекс, металлургия и других.

Наиболее современным и распространенным средством измерения температуры являются кабельные термоэлектрические преобразователи различных градуировок. Преимуществом кабельных термопар является большее быстродействие и удобство монтажа на объекте контроля [2]. Однако для кабельных термопар характерны те же источники погрешности, что и для кабельных термоэлектрических преобразователей: нестабильность ЭДС, влияние внешних магнитных полей, неполный тепловой контакт с объектом измерения и другие [1]. Для прогностической оценки вероятной погрешности измерения, возникающей вследствие неполного контакта может быть использован аппарат математического моделирования процесса теплопереноса при нагревании датчика [1].

Так как определяющее влияние на результирующую ЭДС оказывают значения температур рабочего спая и холодных концов термопары, то в задаче теплопереноса будет рассматриваться процесс нагревания чувствительно элемента до спая включительно. Схема области решения задачи теплопроводности показана на рисунке 1.

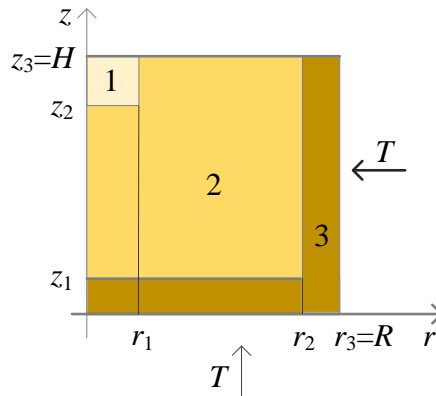


Рис. 1. Схема области решения задачи теплопереноса: 1 – спай термопары; 3 – изолирующий порошок; 5 – защитный чехол; z – осевая координата; r – радиальная координата; T – измеряемая температура; H – высота чувствительного элемента; R – радиус чувствительного элемента термопары

Процесс теплопереноса в рассматриваемой системе «спай – изоляция – чехол» описывается системой дифференциальных уравнений:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right), t > 0, 0 < r < r_1, z_2 < z < H; \quad (1)$$

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right), t > 0, 0 < r < r_2, z_1 < z < z_2; r_1 < r < r_2, z_2 < z < H; \quad (2)$$

$$c_3 \rho_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right), t > 0, 0 < r < r_3, 0 < z < z_1; r_2 < r < r_3, z_1 < z < H. \quad (3)$$

В системе уравнений применены следующие обозначения: t – время, с; T_i – температура, К; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

На внутренних границах системы ($r=r_1, z=z_2, r=r_2, z=z_1$) приняты граничные условия IV рода [1]. На границе $r=R$ заданы граничные условия первого рода: $r=R, T=T_r$, где T_r – измеряемое значение температуры. Граничные условия $r=0$ (условие симметрии):

$$r=0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0.$$

На границе $z=0$ заданы условия: $z=0; T=T_r$.

Граничные условия на границе $z=H$: $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$.

Область решения задачи (рис. 1) разбита на равномерную сетку с шагом $2,5 \cdot 10^{-2}$ мм. Шаг по временной сетке составлял $\Delta t = 10^{-3}$ с.

Система уравнений 1 – 3 с соответствующими начальными и граничными условиями решались с применением метода конечных разностей [3]. Теплофизические характеристики элементов (спай, изолирующий порошок, металлический чехол) аппроксимированы методом наименьших квадратов по справочным значениям [4,

5]. В таблице приведены результаты расчета необходимой длительности нагревания датчика для получения достоверных результатов измерений хромель-алюмелевой термопарой для различных видов изоляции – оксида магния MgO и окиси алюминия Al_2O_3 . Расчеты выполнены для разных диаметров чувствительного элемента d .

Таблица 1

Требуемые длительности нагревания датчика для получения достоверных результатов измерений

T, К	d=4		d=5		d=6		d=7		d=8	
	MgO	Al ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃
300	0,190	0,189	0,283	0,281	0,484	0,482	0,592	0,589	0,752	0,749
400	0,433	0,431	0,644	0,641	1,109	1,107	1,356	1,351	1,718	1,712
500	0,491	0,490	0,731	0,782	1,261	1,258	1,541	1,536	1,952	1,945
600	0,527	0,525	0,783	0,780	1,351	1,348	1,651	1,646	2,092	2,085
700	0,552	0,550	0,821	0,817	1,416	1,413	1,730	1,725	2,192	2,184
800	0,571	0,569	0,850	0,846	1,466	1,463	1,792	1,786	2,269	2,262

Из таблицы видно, что для одинаковых условий (диаметр чувствительного элемента, тип термопары) требуемое время нагревания датчиков с изоляцией из порошка окиси алюминия будет меньше. При этом разница в полученных значениях увеличивается с ростом измеряемой температуры, а также с увеличением размеров чувствительного элемента. На рисунке 2 показаны зависимости требуемой длительности выполнения измерений от контролируемой температуры для термопар типа ТХА (К) и ТЖК (J).

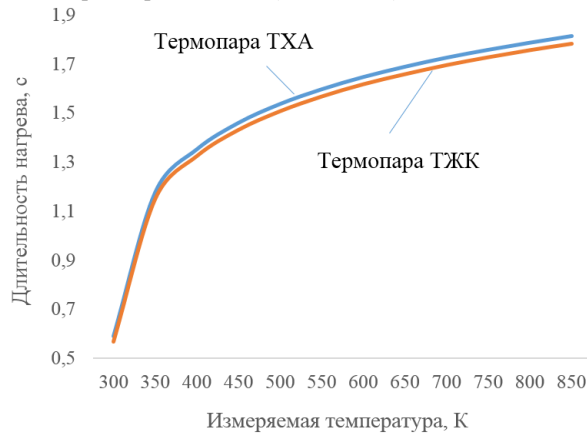


Рис. 2. Зависимость требуемой длительности нагревания кабельных термопар типа ТХА (К) и ТЖК (J)

В работе представлены результаты моделирования процесса теплопереноса в чувствительном элементе кабельных термопар типов ТХА (К) и ТЖК (J) с различными типами изолирующего порошка. Определено, что длительность нагревания хромель-алюмелевой термопары превышает этот показатель для железо-константановых термопар, в среднем, на 1 %. Также определено, что термопары, изоляция которых выполнена из окиси алюминия являются менее инерционными по сравнению с датчиками с изоляцией из оксида магния. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании систем автоматического контроля и управления, а также систем автоматических блокировок и защит.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 18-38-00028).

Литература

1. Yashutina O.S., Atroshenko Y.K., Strizhak P.A. Mathematical Simulation of Thermal Contact of the Thermocouple for Research of an Error of Measurements // Recent Advances in Mathematical Methods in Applied Sciences. – Saint Petersburg, 2014. – P. 280 – 283.
2. Гук О.П., Стадник Б.И., Яцишин С.П. Высокорекурсивные кабельные термоэлектрические преобразователи температуры. Проблемы надежности // Термоэлектричество. – Черновцы, Украина, 2004. – № 2. – С. 74 – 79.
3. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука. 1989. – 616 с.
4. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов: справочное руководство. – М.: Физмалит, 1959. – 356 с.
5. Шелудяк Ю.Е., Кашпоров Л.Я., Малини Л.А., Цалков В.Н. Теплофизические характеристики компонентов горючих систем. – м.: НПО «Информ ТЭИ», 1992. – 184 с.